

FENGZIYUAN PINGGU
JI FENGDIANCHANG XUANZHI SHILI

风资源评估 及风电场选址实例

肖松 刘艳娜 著



东北大学出版社
Northeastern University Press

风资源评估及风电场选址实例

肖 松 刘艳娜 著



东北大学出版社

· 沈 阳 ·

© 肖 松 刘艳娜 2016

图书在版编目 (CIP) 数据

风资源评估及风电场选址实例 / 肖松, 刘艳娜著. — 沈阳: 东北大学出版社, 2016. 7
ISBN 978 - 7 - 5517 - 1350 - 4

I. ①风… II. ①肖… ②刘… III. ①风力能源—资源评估 ②风力发电—发电厂—选址 IV. ①TK81②TM62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 176549 号

出 版 者: 东北大学出版社

地址: 沈阳市和平区文化路三号巷 11 号

邮编: 110819

电话: 024 - 83687331(市场部) 83680267(社务部)

传真: 024 - 83680180(市场部) 83687332(社务部)

E-mail: neuph@neupress.com

http://www.neupress.com

印 刷 者: 沈阳航空发动机研究所印刷厂

发 行 者: 东北大学出版社

幅面尺寸: 185mm × 260mm

印 张: 16.5

字 数: 358 千字

出版时间: 2016 年 7 月第 1 版

印刷时间: 2016 年 7 月第 1 次印刷

策划编辑: 向 阳

责任编辑: 李 佳

封面设计: 刘江畅

责任校对: 叶 子

责任出版: 唐敏志

ISBN 978 - 7 - 5517 - 1350 - 4

定 价: 75.00 元

前 言

随着一次能源的大量消耗和环境的日益恶化，作为绿色能源的风能越来越受到世界各国的广泛重视，而风力发电也成为全球能源增长的亮点，并迅速成为一个朝阳产业。风能就是空气流动所产生的动能，取之不尽，用之不竭。合理利用风能，既可以减少环境污染，又可以减轻能源短缺所造成的压力。

开发利用风能资源，对我国实现节能减排目标来说具有十分重要的战略意义。风力发电替代火力发电，不仅可以缓解我国能源结构中煤炭消耗比例过大的问题，而且可以减少二氧化碳、氮氧化物、硫氧化物及粉尘颗粒物的排放，从而达到改善环境的目的。要合理利用风能，必须对风资源进行评估，并且在此基础上进行风力发电项目的可行性分析。

本课题组（新能源技术研发课题组）长期以来一直从事风资源评估及风电场微观选址方向的研究，通过“四子王旗乌兰花（1#）49.5MW 风电工程风电场微观选址项目”的开展，根据风能资源的特性，结合流体力学等相关学科知识，经多年实际工程经验总结出风电场微观选址过程中风资源评估及相关计算的方法和流程。

本书的出版得到了昆明理工大学学科方向团队——昆明理工大学应用电化学重点实验室及能源化工新型催化剂和新能源材料——的大力支持。在编写过程中，还得到陈晓瑜、李子奥等研究生的支持和帮助，在此一并表示感谢。

由于作者学识有限，且时间仓促，书中不妥之处在所难免，敬请广大读者不吝指正。

作 者

2016年4月

目 录

第 1 篇 风电产业发展现状	1
第 1 章 世界风电发展现状	3
1.1 发展概述	3
1.2 发展特点	5
1.2.1 全球风电发展平稳	5
1.2.2 全球区域分布和市场格局	5
1.2.3 新兴市场	6
1.2.4 全球风电装备价格普遍下滑	8
1.2.5 欧洲海上风电市场	8
1.3 装备制造业发展	10
第 2 章 中国风电发展现状	12
2.1 发展规模	12
2.2 区域特点	13
2.3 项目储备	14
2.4 发展特点	15
2.4.1 “三北”地区仍是主要区域	15
2.4.2 内陆地区风电开发加速	15
2.4.3 大型风电基地建设成果显著	15
2.4.4 部分地区“弃风”严重	16
2.5 海上风电	17
2.5.1 前期工作	17
2.5.2 建设成果	18
第 2 篇 风的基本知识	19
第 3 章 风	21
3.1 风的起源及特性	21

3.1.1	风的形成	21
3.1.2	几种常见的风	23
3.1.3	关于空气的密度和压力	24
3.2	风的描述	25
3.2.1	风速	25
3.2.2	风向	25
3.2.3	风能	26
3.2.4	平均风能密度和有效风能密度	27
3.3	风的变化	29
3.3.1	风随时间的变化	29
3.3.2	风随高度的变化	30
3.3.3	影响风速的主要因素	32
3.4	风的统计理论	33
3.4.1	风向频率	33
3.4.2	风速频率	34
3.4.3	利用风速的概率分布计算风能	36
3.5	我国风能资源区划	40
3.5.1	我国风能资源分区	40
3.5.2	风能的三级区划指标体系	42
第4章 风能资源测量		44
4.1	风能资源调查	44
4.1.1	风能资源调查依据	44
4.1.2	风能资源调查的要求	44
4.2	风电场场址选择	45
4.2.1	场址选择的步骤	45
4.2.2	风电场选址的技术标准	45
4.2.3	风电场选址原则、程序和方法	46
4.3	风能资源测量	50
4.3.1	风能资源的测量分析	50
4.3.2	测量仪器及设备安装	51
第5章 风能资源评估		64
5.1	风能资源的评估程序	64
5.1.1	风能资源评估步骤	64
5.1.2	风能资源评估参数	66
5.2	风资源评估实例	67
5.2.1	直接利用风速资料计算风能	67
5.2.2	利用风速的概率分布计算风能	69

第3篇 风电场选址实例 73

第6章 49.5MW 风电场选址 75

6.1 综合说明	75
6.1.1 概述	75
6.1.2 风能资源	76
6.1.3 工程地质	76
6.1.4 项目任务和规模	77
6.1.5 风电场场址选择	78
6.1.6 风力发电机组选型和布置	79
6.1.7 电气	80
6.1.8 土建工程	80
6.1.9 施工组织设计	81
6.1.10 工程管理设计	81
6.1.11 环境保护和水土保持	81
6.1.12 工程投资概算	82
6.1.13 财务评价	83
6.1.14 结论与建议	84
6.2 风能资源	87
6.2.1 概述	87
6.2.2 参证气象站	87
6.2.3 风电场测风概况	91
6.2.4 资料分析与整理	97
6.2.5 风电场测风年风况分析	107
6.2.6 风电场风能资源分析及评价	131
6.2.7 风能资源综合评价	142
6.3 工程地质	142
6.3.1 工程概况	142
6.3.2 地形地貌与不良地质现象	142
6.3.3 地基土的构成与分布	142
6.3.4 场地地下水	143
6.3.5 结论	143
6.4 项目任务与规模	143
6.4.1 电力系统概况	143
6.4.2 系统继电保护及安全自动装置	153
6.4.3 调度自动化	155
6.4.4 通信	157

6.5	风电机组选型、布置及发电量估算	161
6.5.1	风力发电机组机型初选	161
6.5.2	风电场机组总体布置	164
6.5.3	上网电量分析	167
6.5.4	各种机型方案经济比较	168
6.6	电气	171
6.6.1	概述	171
6.6.2	电气主接线	171
6.6.3	短路电流及主要设备选择	171
6.6.4	绝缘配合及过电压保护	172
6.6.5	接地	172
6.6.6	升压站电气总平面布置	172
6.6.7	升压站的站用电及照明	172
6.6.8	电缆设施及防火	173
6.6.9	220kV 升压站监控系统	173
6.6.10	二次接线	174
6.6.11	直流系统	175
6.6.12	交流不停电电源 (UPS) 系统	175
6.6.13	元件保护	175
6.6.14	微机防误闭锁装置	176
6.6.15	自动装置	176
6.6.16	风电场电气二次部分	176
6.6.17	火灾检测及报警系统	177
6.7	消防	178
6.7.1	工程概况和消防总体设计	178
6.7.2	工程消防设计	179
6.7.3	安全疏散通道和消防通道	180
6.7.4	消防给水	180
6.7.5	消防电气	180
6.7.6	通风空调系统的防火设计	181
6.7.7	消防监控系统	181
6.7.8	消防工程主要设备	181
6.7.9	建筑消防	182
6.7.10	施工消防	182
6.8	土建工程	183
6.8.1	土建部分	183
6.8.2	站区总布置与交通运输	186
6.8.3	供水方案及给水系统	187
6.8.4	采暖通风及空气调节	189
6.9	施工组织设计	190

6.9.1	施工条件	190
6.9.2	施工总布置	191
6.9.3	施工交通运输	192
6.9.4	主体工程施工	193
6.9.5	施工总进度	197
6.10	工程管理设计	198
6.10.1	工程管理机构	198
6.10.2	主要管理设施	199
6.11	环境保护与水土保持	200
6.11.1	环境保护	200
6.11.2	水土保持	202
6.12	劳动安全与工业卫生	204
6.12.1	概述	204
6.12.2	防火、防爆	204
6.12.3	防电伤、防机械伤害、防坠落和其他伤害	205
6.12.4	防噪声、振动及电磁干扰	205
6.12.5	其他安全措施	205
6.12.6	安全卫生机构及人员配置	205
6.13	工程设计概算	206
6.13.1	编制说明	206
6.13.2	投资概算	207
6.14	财务评价与社会效益分析	215
6.14.1	概述	215
6.14.2	财务评价	215
6.14.3	工程经济效益指标及经济评价	217
6.14.4	社会效益评价	217
6.15	建设项目节能分析	218
6.15.1	设计依据及合理用能标准	218
6.15.2	本项目的能耗种类和数量分析	218
6.15.3	节能措施	219
6.15.4	节约用地	219
6.15.5	节约原材料	220
6.16	结论	220
	参考文献	221
	附录	226

第1篇

风电产业发展现状



第1章 世界风电发展现状

1.1 发展概述

在世界经济持续低迷的背景下，风电产业发展势头良好。根据全球风能理事会（GWEC）统计数据显示，2011年全球范围新增装机容量达40564MW，从而使全球范围累计装机容量达237669MW，实现了累计装机容量超过20%的年增长速度，但与2007—2010年的增长率相比，全球范围装机容量增长速度放缓。（见表1-1和图1-1）。

表 1-1 全球范围风电市场增长率（2006—2011年）

年份	新增装机/MW	增速/%	累计装机/MW	增速/%
2006	15245		74052	
2007	19866	30	93820	27
2008	26560	34	120291	28
2009	38610	45	158864	32
2010	38828	1	197637	24
2011	40564	4	237669	20

数据来源：GWEC, Globle Wind Report 2011。

截至2011年，全球共有75个国家具有商业运营的风电装机，其中装机容量超过1GW的国家有22个。据GWEC统计，2011年全球新增装机容量排名前十位的国家分别是中国（17631MW）、美国（6810MW）、印度（3019MW）、德国（2086MW）、英国（1293MW）、加拿大（1267MW）、西班牙（1050MW）、意大利（950MW）、法国（830MW）和瑞典（763MW）（见图1-2）。全球前十位国家的装机容量主导着全球88%的风电新增装机市场。另外，全球累计装机容量排名前十位的国家分别是中国（62364MW）、美国（46919MW）、德国（29060MW）、西班牙（21674MW）、印度（16084MW）、法国（6800MW）、意大利（6737MW）、英国（6540MW）、加拿大（5265MW）和葡萄牙（4083MW）（见图1-3）。

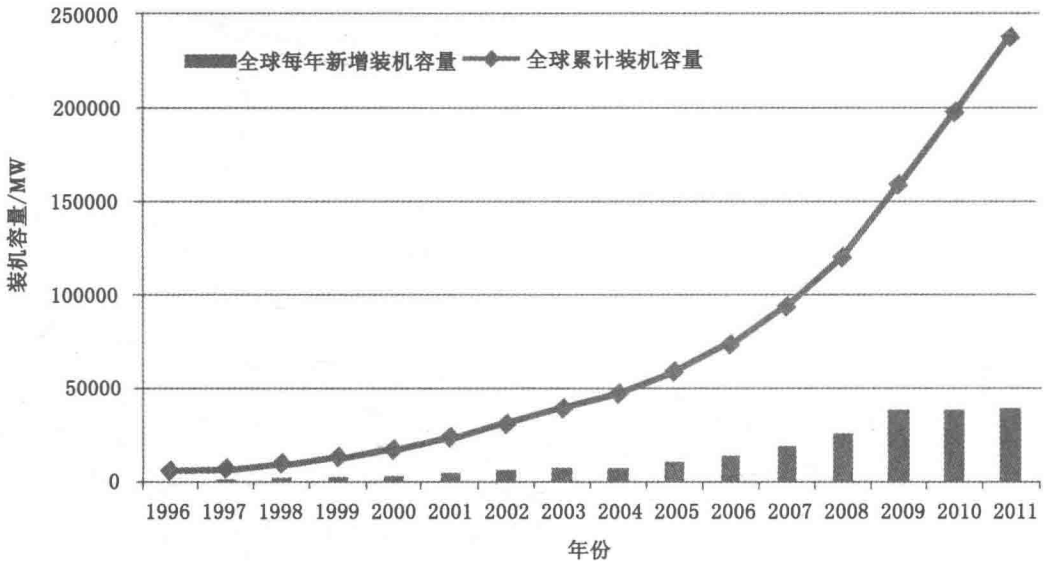


图 1-1 全球范围新增和累计装机容量变化趋势 (1996—2011 年)

(数据来源: GWEC, Goble Wind Report 2011)

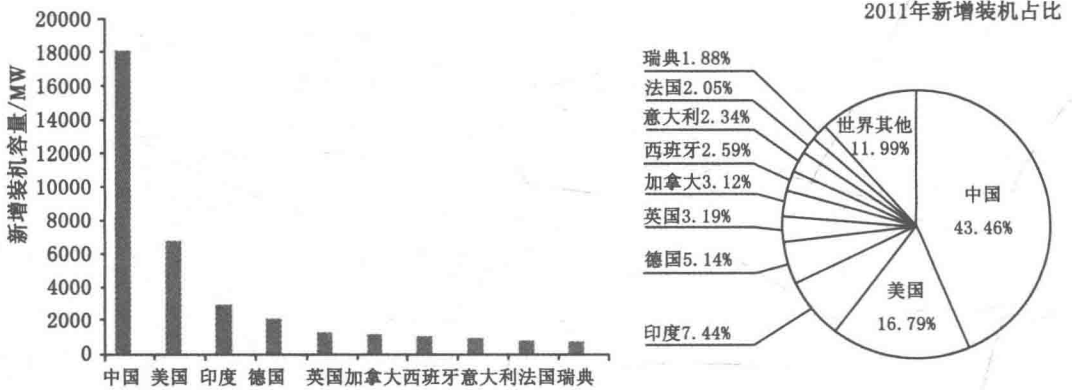


图 1-2 2011 年全球新增装机容量前十位国家

(数据来源: GWEC, Goble Wind Report 2011)

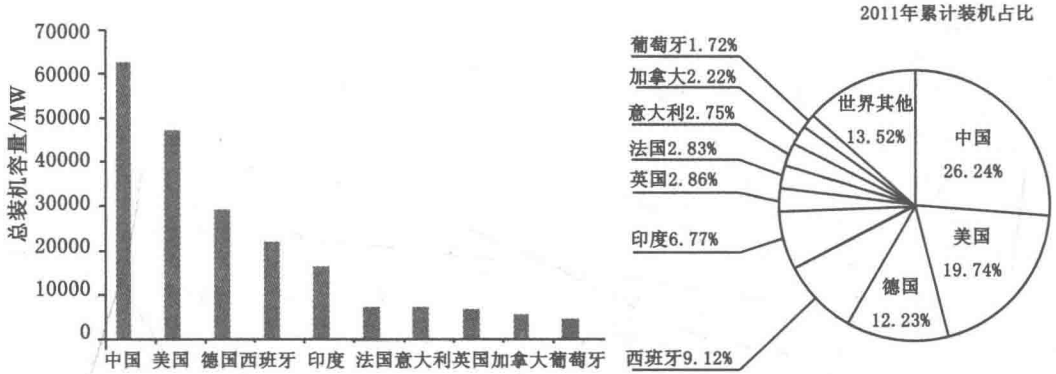


图 1-3 2011 年全球累计装机容量前十位国家
(数据来源: GWEC, Global Wind Report 2011)

1.2 发展特点

在全球经济整体低迷的背景下,风电的发展还是取得了令人满意的成果,累积装机容量不断提高,同比增长 20%,新增超过 40GW,累计装机容量达 238GW。

1.2.1 全球风电发展平稳

虽然累计装机容量持续增长,但是风电产业开始从高速发展转变为稳步发展,新增装机容量增速开始变缓。如图 1-4 所示,风电经历了 2005—2009 年高速发展过程,这一阶段年装机容量增速在 30%~40%;2009 年以后,风电增速开始放缓,年装机容量增速降至 6%左右,全球的风电发展进入到了平稳期,新增的装机容量保持在 40GW 左右。

1.2.2 全球区域分布和市场格局

中国、欧盟、美国占据主导地位的风电发展的区域分布和格局没有发生变化,见表 1-2。中国继续领跑累计装机容量,2011 年新增装机容量达到 17631MW,占全球新增市场份额的 43%,累计装机容量达 62364MW。在风能生产税抵减(PTC)政策延长刺激下,美国风电发展出现了反弹,2011 年新增装机容量 6810MW,相比上年增幅高达 28%。欧洲 2011 年新增装机容量 10226MW,累计装机容量达 97588MW,据欧洲风能协会统计,风电可以满足欧洲 6%的用电量。传统市场中德国、英国、西班牙、意大利、法国、瑞典都进入了世界前十。从累计容量上看,德国依然领跑欧洲风电,紧随其后的是西班牙、英国、法国和意大利。

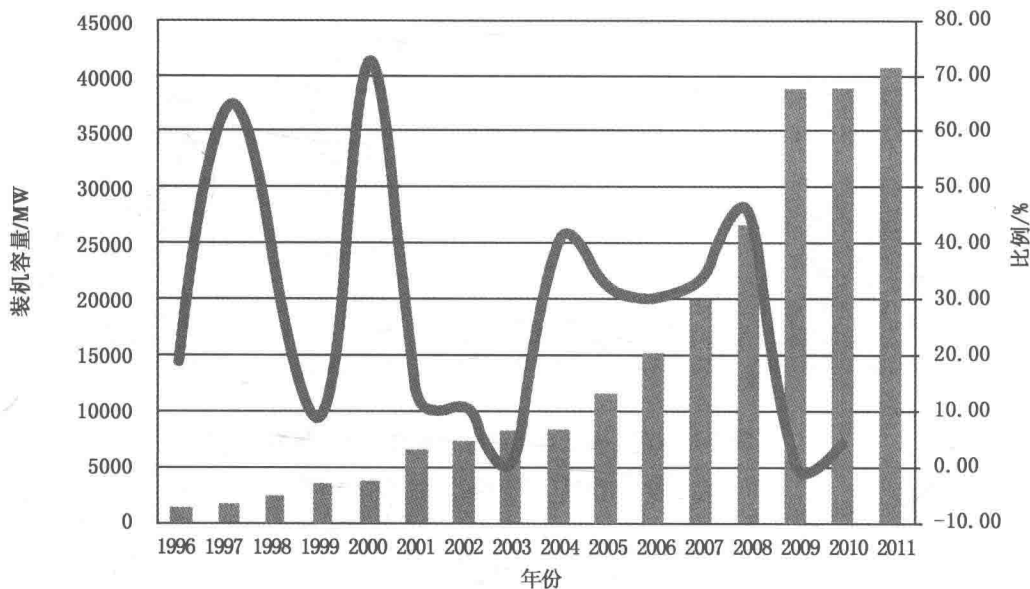


图 1-4 全球风电新增装机容量发展历程 (1996—2011 年)

(数据来源: GWEC, Global Wind Energy Update 2011)

表 1-2 2011 年全球风电新增/累计装机容量前十名

国家	新增装机容量/MW	占比/%	国家	累计装机容量/MW	占比/%
中国	17631	43	中国	62364	26.2
美国	6810	17	美国	46919	19.7
印度	3019	7	德国	29060	12.2
德国	2086	5	西班牙	21674	9.1
英国	1293	3.2	印度	16084	6.8
加拿大	1267	3.1	英国	6800	2.9
西班牙	1050	2.6	法国	6737	2.8
意大利	950	2.3	意大利	6540	2.7
法国	830	2	加拿大	5265	2.2
瑞典	763	1.9	葡萄牙	4083	1.7
世界其他	4865	12	世界其他	32143	13.5
前十名合计	35699	88	前十名合计	205526	86.5
世界合计	40564	100	世界合计	237669	100

数据来源: GWEC, Global Wind Report 2011。

1.2.3 新兴市场

印度、加拿大、巴西等国家及地区风电的发展,成为拉动全球风电市场发展的增长力量。其中,印度在政府的激励政策的刺激下,私营投资不断涌入,风电实现了里程碑式发

展，2011年新增装机容量3019MW，同比增长50%。拉丁美洲的表现也相当亮眼，新增装机852MW，其中包括巴西的583MW，使其累计容量达到1509MW。从2009年起，巴西政府已组织了三次大型可再生能源项目招标，其中风电项目是招标的重头，这使得越来越多的风电制造商开始进入巴西市场，并且开始在巴西建厂，推动了巴西市场的繁荣。拉丁美洲的另一亮点是墨西哥，2011年墨西哥修订了《可再生能源法》，修订法案将要求相关政府部门制定可再生能源发展的目标和激励机制，此举受到了可再生能源产业的大力支持。2011年墨西哥新增装机容量达到50MW，累计装机容量达569MW。加拿大2011年风电装机同比翻番，新增装机容量达1267MW，累计装机容量达到5265MW。特别是安大略省，由于2009年推出了清洁能源电力强制上网政策，极大地刺激了风电的快速发展，已经成为全球风电投资的热点地区（见图1-5和图1-6）。

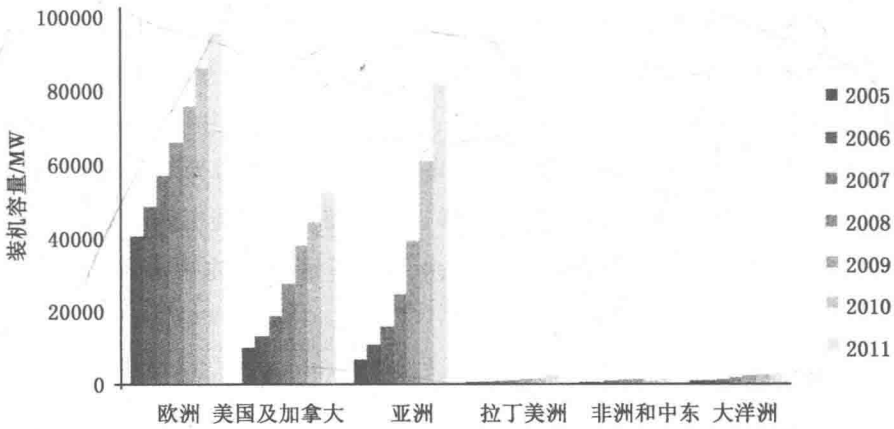


图 1-5 全球累计装机容量发展区域分布
(数据来源: GWEC, Globle Wind Report 2011)

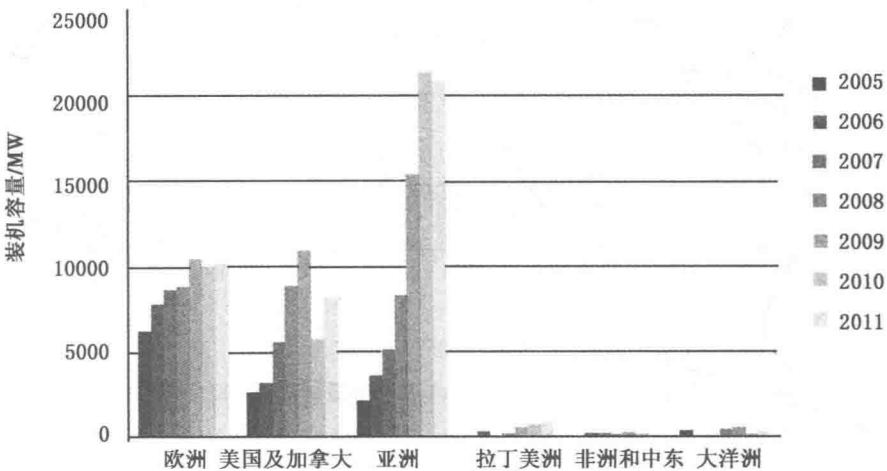


图 1-6 全球新增装机容量发展区域分布
(数据来源: GWEC, Globle Wind Report 2011)

1.2.4 全球风电装备价格普遍下滑

从2009年开始,风机价格开始下滑,下滑趋势一直持续到2012年初。该阶段,全球1.5MW风机的平均价格降低了40%,在2011年甚至降到4000元/kW以下。中国市场的风电整机产品价格2009—2010年度已经大幅度下降的情况下,2011年与2010年相比,价格又下降了12%左右,平均价格降至3800元/kW。

2012年上半年,中国政府针对风机制造和风电并网出台的一系列规范和标准致使风机价格开始趋于稳定,甚至出现一些增长。预计2018年,中国的风机价格会更加稳定,但欧洲和美国却可能因为产能过剩和风机技术趋于成熟使风机价格继续下降。

1.2.5 欧洲海上风电市场

海上风电作为全球风电最新的技术发展趋势及未来最有可能降低风电发电成本的新技术一直备受全球关注。截至2011年,海上风电的装机容量所占全球总装机容量的比例不足2%,按照最乐观预测,到2020年,海上风电装机容量所占全球风电装机容量约为10%。根据GWEC统计,2011年全球海上风电新增装机容量约为1000MW,增长速度为-2.5%。海上风电的发展任重道远。全球90%以上的海上风电装机容量发生在欧洲,特别集中在北海、波罗的海、英吉利海峡等地;余下的不足10%主要在亚洲,特别是中国(见图1-7)。

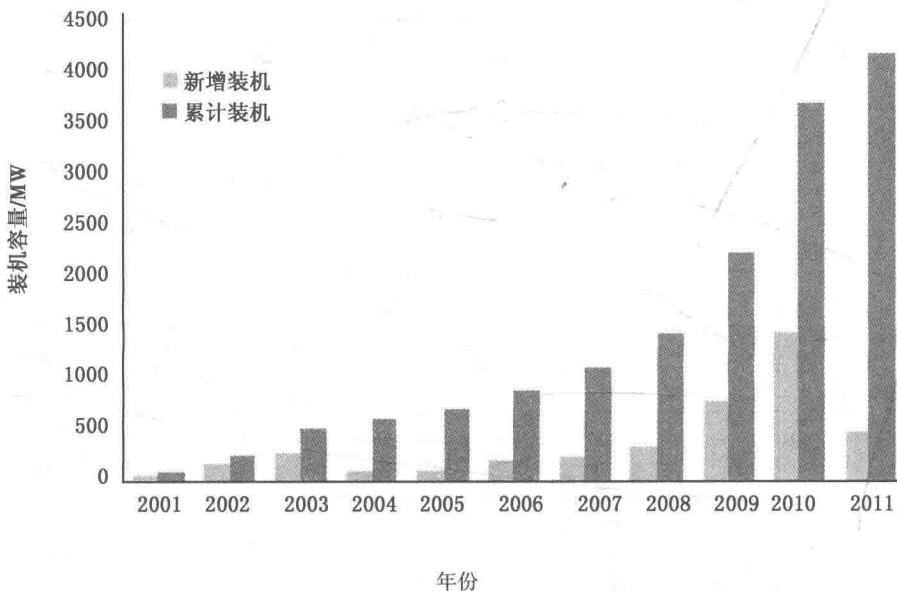


图 1-7 全球海上风电累计和新增历年装机容量情况 (2001—2011 年)

(数据来源: BTM Consult - A part of Navigant Consulting, World Market Update 2011)

根据欧洲风能协会统计,2011年欧洲海上风机装机容量为866MW,总投资额达24亿欧元。海上风电累计装机容量达到3813MW,分布在欧洲10个国家的53个风电场中。新